

Mirosław CHUDEK
Politechnika Śląska, Gliwice
Wiktor KRAWIEC
Politechnika Kijowska, Ukraina

WŁASNOŚCI FIZYKOMECHANICZNE GRUNTÓW W ZBOCZACH CZYNNIKIEM DECYDUJĄCYM O ICH STATECZNOŚCI

Streszczenie. Stateczność skarp i zboczy, oprócz innych czynników, zależy od własności fizykomechanicznych gruntów, gęstości ich struktury, a także od zmiany parametrów wytrzymałościowych gruntu przy nawilżaniu. Przedmiotowy referat omawia te własności.

PHYSICAL AND MECHANICAL GROUND PROPERTIES IN SLOPES AS DETERMINING FACTOR OF STABILITY

Summary. Scarps and slopes stability except the other factor depend on physical and mechanical ground properties, density of structure and change of strength properties at moistening. The subject of this paper is discussion about above mentioned properties.

1. Ocena własności mechanicznych gruntów w elementach zbocza – brzeżnych obszarach stromych statycznych niecek osiadania

Przyjmujemy, że mechaniczne własności gruntów określają następujące parametry: kąt tarcia wewnętrznego (φ), spoistość (c), współczynnik parcia boczego (ξ), potencjalne odkształcenia objętościowe i naprężenia graniczne.

Jeżeli z masywu gruntowego zbocza umownie wyciąć elementarny równoległoscian i przeanalizować główne czynniki wpływające na własności gruntu, to można przekonać się, że istotny wpływ na zmianę własności gruntów wykazują takie czynniki, jak: współczynnik porowatości (e), wilgotność (w), stopień wilgotności (S_r), stopień rozproszenia i własności mineralogiczne, stan naprężeń (σ), rozmiary geometryczne wydzielonego elementu, anizotropia warstw, zmiany warunków hydrogeologicznych – przepływ wody w górotworze

itd. Biorąc pod uwagę fakt, że jednorodny grunt w każdym punkcie masywu charakteryzuje się różnymi wartościami e , S , σ itd., stąd własności wytrzymałościowe i odkształceniowe elementów gruntu przyległych do siebie będą się różniły między sobą jednak o wartości przeważnie nieskończenie małe.

Wartości graniczne naprężeń względnych i odkształceń określano, wykorzystując zależności zachowania się gruntu przy ścinaniu w przyrządzie ścinającym odwodnionych (zdrenowanych) próbek wyciętych z masywu gruntu części osuwiska.

Na podstawie badań stwierdzono, że przy ścinaniu gruntu o budowie luźnej (sypkiej) następuje wzrost ciężaru właściwego szkieletu gruntu (γ_d) od pewnej wartości początkowej γ_{do} do wartości krytycznej γ_{dcr} . W procesie osuwania się (ścianania) gruntu zagęszczonego zachodzi jego rozluźnienie, które jest tym większe, im wyższy jest poziom naprężeń granicznych gruntu i przy odpowiedniej wartości naprężeń ostateczna wartość ciężaru właściwego szkieletu jest również równa wartości krytycznej.

Dążenie do zmiany ciężaru właściwego szkieletu gruntu przy ścinaniu odwodnionych próbek od wartości początkowych do krytycznych należy zaliczyć do podstawowych praw mechaniki ośrodka sypkiego. Jako wartość krytyczną ciężaru właściwego szkieletu gruntu w naszym przypadku przyjmujemy taką jego wartość, przy której ścinanie odwodnionego gruntu nie powoduje zmiany objętości szkieletu gruntu.

Wartość krytycznego ciężaru właściwego szkieletu określamy w zależności od poziomu przekazywanych na próbkę statycznych (lub dynamicznych – przy wibracyjnym zagęszczeniu próbki) naprężeń σ , stopnia wilgotności, składu granulometrycznego, modułu odkształceń (E_0) itp. Przy tym współczynnik porowatości gruntu (początkowy – dla naturalnej budowy gruntu) wynosi:

$$e_0 = \frac{\gamma}{\gamma_o}(1 + w) - 1$$

$$e_{cr} = e_{ocr} - \operatorname{tg} \alpha \ln \frac{\sigma}{\sigma_0},$$

gdzie: γ_o – ciężar objętościowy gruntu [kN/m^3],

γ_s – ciężar właściwy gruntu [kN/m^3],

e_{ocr} – wartość początkowa porowatości krytycznej gruntu przy ciśnieniu σ_0 ,

$\operatorname{tg} \alpha$ – współczynnik proporcjonalności,

e_{cr} – współczynnik porowatości gruntu w stanie naturalnym,

e_o – współczynnik porowatości gruntu w warunkach naturalnych,

σ – zmiana ciśnienia w zagęszczonym gruncie [MPa],

σ_0 – ciśnienie gruntu w stanie naturalnym [MPa].

Należy zauważyć, że ze zwiększeniem stopnia wilgotności S_r , zależnego od stanu atmosfery, do stanu pełnego nasycenia, wartość krytycznego ciężaru właściwego szkieletu początkowo wynosi:

$$S_r = \frac{W\gamma}{\gamma_w e_0},$$

gdzie zmniejsza się – dla $S_r = 0,15 \div 0,3$, a następnie dla $S_r \geq 0,6$ gwałtownie rośnie.

Ze zwiększeniem stopnia dyspersyjności gruntu o identycznym składzie mineralogicznym krytyczny ciężar właściwy szkieletu również wzrasta.

Wartość krytycznego ciężaru właściwego szkieletu dla stałych wartości stopnia wilgotności i naprężeń rozpatrywano jak granicę, dzielącą niedogęszczony i przegęszczony grunt. Dla przypadku ogólnego własności mechaniczne gruntu cechowały stany przegęszczone dla $\gamma_d > \gamma_{dcr}$ i niedogęszczone, jeśli $\gamma_d < \gamma_{dcr}$.

Charakterystyki mechaniczne i inne również posiadają swoje wartości krytyczne φ_{cr} , C_{cr} , ζ_{cr} , E_{ocr} . Proces deformowania dowolnego rodzaju gruntu przy jego nawilżaniu lub dodatkowym obciążaniu prowadzi do zmian wytrzymałościowych i odkształceniowych charakterystyk od pewnych początkowych i krytycznych wartości, przy czym wartości krytyczne charakterystyk mechanicznych zależą od wilgotności i stopnia dyspersji.

Wartości krytyczne charakterystyk mechanicznych gruntu przy określonych warunkach granicznych zostały w pracy rozpatrzone jako parametry, zapewniające stateczność zboczy i skarp. Krytycznym wartościom charakterystyk mechanicznych odpowiada stan gruntu o gęstości normalnej, dla którego:

$$\rho_\varepsilon = \frac{\gamma_d}{\gamma_{cr}} = 1; \rho_\sigma = \frac{\sigma_i}{\sigma_{cr}} = 1; \rho_\tau = \frac{\tau_{ij}}{\tau_{cr,ij}} = 1, \quad (1.1)$$

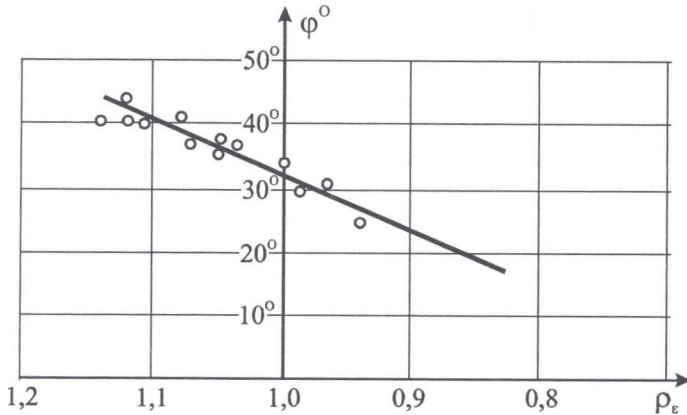
gdzie: $\rho_\varepsilon, \rho_\sigma, \rho_\tau$ – bezwymiarowe parametry stanu mechanicznego gruntu.

Stopień zagęszczenia gruntu określano w warunkach laboratoryjnych za pomocą wyciętych próbek ze zbocza zależnością (1.1), przy czym dla niedogęszczonego gruntu $\rho_\varepsilon < 1$, $\rho_\sigma < 1$, $\rho_\tau < 1$, a dla przegęszczonego odpowiednio: $\rho_\varepsilon > 1$, $\rho_\sigma > 1$, $\rho_\tau > 1$. Parametry bezwymiarowe stanu mechanicznego ρ_ε , ρ_σ i ρ_τ jednoznacznie określają własności mechaniczne dowolnego wydzielonego w skarpie lub zboczu elementu gruntu. Przykładowo, własności wytrzymałościowe gruntów określamy zależnościami ekstremalnymi $\varphi \sim \rho_\varepsilon$, $C \sim \rho_\varepsilon$ lub $\varphi \sim \rho_\sigma$, $C \sim \rho_\sigma$, które otrzymano w warunkach laboratoryjnych podczas badań gruntu

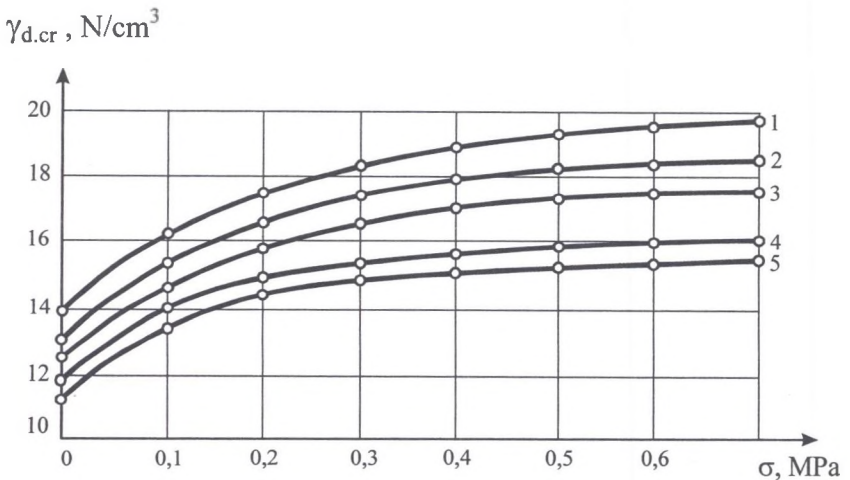
według metodyki ścinania odwodniowego. Charakter zależności $\varphi \sim \rho_\varepsilon$ i $\gamma_{cr} \sim \sigma$ dla różnych wartości S_r dla gruntu związłego (gliniastego) przedstawiono na rys. 1 i 2. Związek pomiędzy ρ_ε i ρ_σ opisany jest równaniem:

$$\rho_\varepsilon = K_p \rho_\sigma, \quad (1.2)$$

gdzie K_p – współczynnik proporcjonalności.



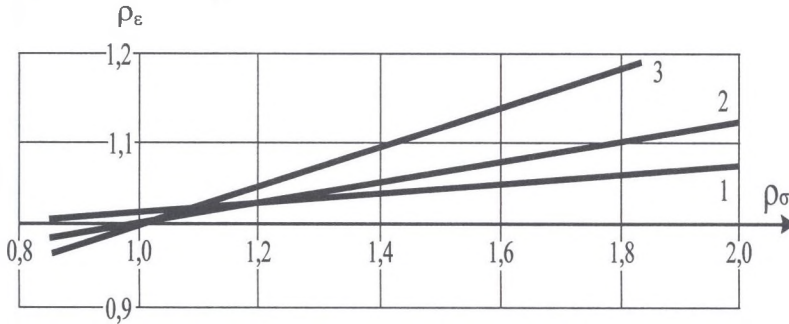
Rys. 1. Zależność kąta tarcia wewnętrznego od bezwymiarowego parametru stanu mechanicznego
Fig. 1. Relationship of friction angle and a dimensionless parameter of a mechanical state



Rys. 2. Zależność krytycznego ciężaru właściwego szkieletu od stopnia wilgotności i ciśnienia pionowego, 1-5 – stopień wilgotności dla 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0

Fig. 2. Relationship between a critical specific gravity of skeleton and a humidity degree and a vertical pressure 1-5 – humidity degree for 0.8; 0.6; 0.4; 0.2; 0

Parametry ρ_ε i ρ_σ między sobą posiadają zależność liniową, co przedstawiono na rys. 1.3. W tym przypadku, jeśli $\rho_\varepsilon = \rho_\sigma = \rho_\tau = 1$, to do określenia charakterystyk wytrzymałościowych należy użyć warunku Coulomba-Mohra. W normalnie zagęszczonym stanie gruntu na własności wytrzymałościowe nie wykazują wpływu wymiary geometryczne badanej próbki, poziom naprężeń i ciężar właściwy szkieletu gruntu.



Rys. 3. Zależność między ρ_ε i ρ_σ dla: 1 – drobnego piasku; 2 – gliny piaszczystej; 3 – gliny
Fig. 3. Relationship between ρ_ε and ρ_σ for: 1 – fine grained sand, 2 – sandy clay, 3 – clay

W niedogęszczonym i przegęszczonym stanie własności wytrzymałościowe gruntu zasadniczo zależą od wymiarów geometrycznych elementów i warunków przekazywania na nie naprężeń. Dlatego zachowanie się niedogęszczonych i przegęszczonych gruntów należy badać na próbkach o dużych wymiarach.

Podczas określania zależności między naprężeniem stycznym τ i normalnym σ z zastosowaniem zasad Coulomba-Mohra, przy dynamicznym ścinaniu badanych próbek, należy uwzględnić bezwymiarowe współczynniki ρ_ε w następującej postaci:

- dla gruntów niezwiązanych (niespoistych)

$$\tau = \rho_\varepsilon \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (1.3)$$

- dla gruntów spoistych

$$\tau = \rho_\varepsilon (\sigma + \sigma_n) \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.4)$$

gdzie:

$$\sigma_n = \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi}.$$

W celu oceny stateczności zboczy należy określić następujące dane fizykomechanicznych charakterystyk gruntów:

- ciężar właściwy szkieletu gruntu γ_d (w stanie suchym jest zawsze mniejszy od γ_0), [kN/m³],
- ciężar właściwy cząstki gruntu γ_s [kN/m³],

- ciężar właściwy gruntu γ , kN/m^3 (przykładowo $\gamma_0 = \gamma = (14,5 \div 15,5) \text{ kN/m}^3$, $\gamma_d = 13,6 \div 13,8 [\text{kN/m}^3]$),
- ciężar właściwy krytyczny szkieletu $\gamma_{d,cr}$ i jego zależność od stanu naprężeń i stopnia wilgotności $\gamma_d(\sigma, S_r)$,
- parametry wytrzymałościowe i ich związek z parametrami bezwymiarowymi stanu mechanicznego $\varphi(\rho_\varepsilon)$, $C(\rho_\varepsilon)$,
- porównanie ciężaru właściwego szkieletu γ_d z ciężarem właściwym granicznym szkieletu (skrajnie) luźnej (sypkiej) struktury gruntu $\gamma_{d,min}$ [kN/m^3].

Wykorzystując wymienione parametry dla dowolnie wydzielonego elementu gruntu, określamy wartości graniczne odkształceń i naprężeń względnych dla danego zbocza lub skarpy.

Wartości graniczne odkształceń względnych ε dowolnego elementu, gdy zmienia się ciężar właściwy szkieletu od sypkiego do budowy naturalnej, określa się równaniem:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_{cr} = \left(1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_{d,cr}}\right) + \left(1 - \frac{\gamma_{d,min}}{\gamma_{d,cr}}\right) \quad (1.5)$$

Dla $\gamma_{d,min} = 0$ otrzymamy:

$$\varepsilon = 2 - \rho_\varepsilon \quad (1.6)$$

Uwzględniając genezę gruntu w naturalnych zboczach lub skarpach, określenie odkształceń względnych ograniczamy do odkształceń objętościowych, które charakteryzują stopień przegęszczenia lub niedogęszczenia gruntu w odniesieniu do stanu zagęszczenia normalnego.

Wartości graniczne naprężeń względnych przy zmianie ciężaru właściwego szkieletu od sypkiego do budowy naturalnej określamy następującymi równaniami:

$$\psi = \psi_{cr} - \psi_0 = \left(1 - \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{cr}}\right) - \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right) \quad (1.7)$$

Dla $\sigma_{min} = 0$ otrzymamy:

$$\psi = \rho_\sigma = \frac{\sigma}{\sigma_{cr}} \quad (1.8)$$

Moduł odkształceń wydzielonych elementów zbocza lub skarpy oblicza się z równania:

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}; \quad E_{o,i} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$E_0 = \frac{3\gamma H \gamma_{d.cr}}{\gamma_{d.cr} - \gamma_d} \quad E_{0,i} = \frac{3\gamma H \gamma_{d.cr}}{4\gamma_{d.cr} - 3\gamma_{d.min} - \gamma_d} \quad (1.9)$$

W ten sposób, do oceny własności mechanicznych gruntów zbocza pobiera się próbki i bada je w laboratorium, na stanowiskach do ścinania i ściskania, określając parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe dla naturalnego stanu gruntu i dla przewidywanych stanów gruntu, wynikających z zewnętrznych wpływów atmosferycznych, a także ciśnień dodatkowych (np. powodowanych podziemną eksploatacją złóż). Określa się zatem niedogęszczenie i zagęszczenie masywu gruntowego w odniesieniu do gęstości normalnej za pomocą współczynników bezwymiarowych.

Bada się zmianę charakterystyk fizykomechanicznych gruntów zbocza lub skarpy podczas opadów atmosferycznych (mobilne nawilżanie) i ich zależności z parametrami bezwymiarowymi stanu mechanicznego. Określa się związek między naprężeniami normalnymi i stycznymi stosując prawo Coulomba-Mohra przy drenującym sposobie badań na ścinanie i na podstawie zbudowanego wykresu $\tau \sim \sigma$ określa się wytrzymałościowe parametry gruntu $C(\rho_\epsilon)$ i $\varphi(\rho_\epsilon)$. Liczy się wartości graniczne odkształceń względnych i wartości graniczne naprężeń względnych za pomocą zmiany ciężaru właściwego szkieletu gruntu o strukturze luźnej (sypkiej) i naturalnej.

2. Określenie gęstości struktury gruntu zbocza w warunkach naturalnych

Ciężar właściwy szkieletu gruntu zbocza w warunkach naturalnych zwiększa się wraz ze wzrostem ciśnienia. Przykładowo, jeśli porowatość zwięzłych (gliniastych) gruntów zbocza zaraz pod powierzchnią wynosi $45 \div 50\%$, to na głębokości $1,5 \div 2,0$ m zmniejsza się do $6 \div 10\%$. W zboczach często spotyka się warstwy zwięzłych i niezwięzłych gruntów o różnej miąższości, dla których ciężar właściwy szkieletu nieznacznie się zmienia wraz z głębokością.

Potencjalna zdolność gruntów do zagęszczenia charakteryzuje się wartością ciężaru właściwego szkieletu w warunkach naturalnych i zależności gęstości krytycznej od stanu naprężeń. Zależność ta podlega prawom półlogarytmicznym, tzn. zachodzi gwałtowna zmiana gęstości krytycznej w obszarach małych ciśnień i stosunkowo powolny przyrost $\gamma_{d.cr}$ w obszarach ciśnień wysokich. Dlatego, jeśli na grunt gliniasty kiedykolwiek wywarły zostanie nacisk (powstaną naprężenia), poza przedziały wytrzymałości, to wartość ciężaru

właściwego szkieletu będzie się zmieniała nieznacznie zarówno przy zwiększaniu głębokości wyrobiska górniczego, jak i zwiększaniu się ciśnienia (obciążenia). Nieznaczna zmiana gęstości wraz ze wzrostem głębokości często obserwowana jest również w warstwach gruntów piaszczystych.

Zagęszczenie gruntu w warunkach naturalnych pod wpływem sił grawitacji w jakimś stopniu jest podobne do ściskania kompresyjnego. Jednakże w przyrządzie do ściskania przy określonym ciśnieniu pionowym gęstość gruntu nie zawsze osiąga wartość krytyczną, gdyż dla takiego rozmieszczenia cząstek gruntu przemieszczenia ścinające nie posiadają wystarczających wartości.

W warunkach naturalnych zagęszczeniu gruntu w zboczach nie sprzyjają procesy tworzenia struktur, wywołujące wzmocnienie wodno-koloidowych, cementujących i innych rodzajów połączeń między cząstkami.

Na rysunku 4 przedstawiono zmianę gęstości masywu gruntowego ze wzrostem nacisku budowli. Jeśli nanieść na ten wykres gęstości krytycznej (krzywa 1, rys. 4) również zmianę ciężaru właściwego szkieletu względem głębokości (prosta 2, rys. 4, a), to zależności te przetną się. Wytlumaczenie jest następujące: na pewnej głębokości ciężar właściwy gruntu jest równy wartości gęstości krytycznej. Na tej głębokości grunt znajduje się w stanie normalnego zagęszczenia wskutek oddziaływania własnego ciężaru. Poniżej punktu przecięcia się grunt może znajdować się w stanie bliskim do normalnego zagęszczenia albo w stanie nieznacznie niedogęszczonym, zaś powyżej punktu przecięcia się (bliżej ku powierzchni) – tylko w stanie przegęszczonym, przy czym w miarę zbliżania się do powierzchni terenu stopień przegęszczenia gruntu wzrasta radykalnie (rys. 4, b, c).

Wskaźnik gęstości struktury gruntu można określić za pomocą współczynnika porowatości, tzn.:

$$N = e - e_{cr} = \gamma_s \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_{d.cr}} \right),$$

gdzie: γ_s – ciężar właściwy cząstek gruntu,

γ_d – ciężar właściwy szkieletu,

$\gamma_{d.cr}$ – krytyczny ciężar właściwy szkieletu gruntu,

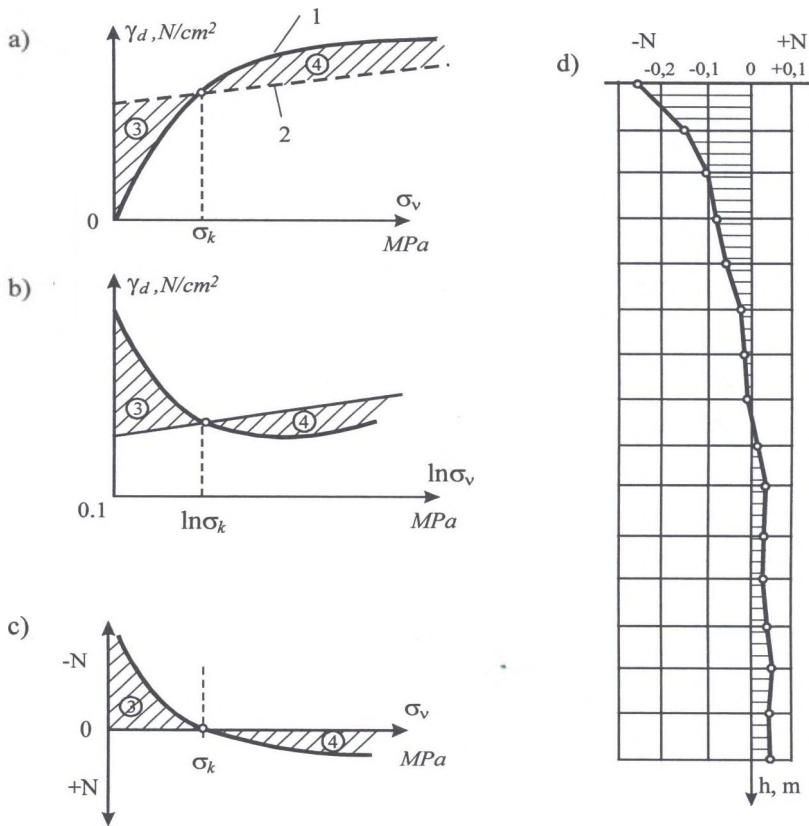
e – współczynnik porowatości gruntu w warunkach budowy naturalnej,

e_{cr} – krytyczny współczynnik porowatości gruntu,

$$\left(e_{cr} = e_{cr.1} - tg\alpha \ln \frac{\sigma}{\sigma_1} \right)$$

e_{cr1} – krytyczny współczynnik porowatości gruntu przy ciśnieniu pionowym (naprężeniu),
równym σ_1 [MPa],

$tg\alpha$ – współczynnik, określający nachylenie krzywej $e_{cr} = f(\ln \sigma)$ do osi odciętych (do osi
naprężeń).



Rys. 4. Zmiana gęstości budowy gruntu ze wzrostem obciążenia budowlą (a,b,c) i wskaźnik gęstości w warunkach naturalnych (d):

1 – gęstość krytyczna; 2 – zmiana ciężaru właściwego szkieletu względem głębokości; 3 – strefa gruntu zagęszczonego; 4 – strefa gruntu niedogęszczonego

Fig. 4. Change of ground density with increase of a load pressure (a, b, c) and density indication in conditions of natural deposition (d):

1 – critical density; 2 – change of specific gravity of skeleton regarding depth; 3 – zones of compacted ground; 4 – zone of non-compacted ground

Przyrost wskaźnika gęstości gruntu można określić dla dowolnego przedziału głębokości dla zbocza zbudowanego z jednej lub kilku warstw gruntów jednorodnych. W tym celu

w przedziałach zadanej głębokości określa się wartości ciężaru właściwego szkieletu i stopień naturalnej wilgotności gruntu. W warunkach laboratoryjnych określa się zależność $\gamma_{d,cr} \sim f(\sigma)$ dla określonej wartości stopnia wilgotności. Należy zauważyć, że w zależności:

$$N = N_1 + tg\alpha \ln \frac{\sigma}{\sigma_1},$$

gdzie: N_1 – wskaźnik gęstości gruntu przy ciśnieniu (naprężeniu) σ_1 [MPa], parametr stanu naprężeń σ/σ_1 stanowi stosunek wartości zmiennej do pewnej stałej określonej w wyniku doświadczeń. Przy czym parametrem stanu naprężeń może być dowolne jedno z głównych naprężeń normalnych, jak również wartość średniego normalnego naprężenia

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3),$$

gdzie:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – składowa naprężeń normalnych.

Wskaźnik gęstości gruntu i odkształcenia względne pod powierzchnią terenu są ujemne, co można wytłumaczyć faktem, że gęstość gruntu pod wpływem ciężaru własnego w miarę zbliżania się ku powierzchni również wzrasta.

W warunkach naturalnego ciśnienia zbocza czy w obszarze brzeżnym statycznej niecki osiadania zmiany gęstości struktury gruntów względem głębokości mogą być inne, gdyż nie tylko nacisk budowli i gęstość naturalna ale i skład gruntu i jego wilgotność mogą zmieniać się wraz z głębokością, co przedstawia rys. 4d.

Zasadnicza niejednorodność wskaźnika gęstości struktury i odkształceń względnych objętości gruntu może wystąpić również w kierunku poziomym.

Parametry mechaniczne różnych rodzajów gruntów zbocza zmieniają się różnie przy wzroście zawartości wody w porach. W gruntach piaszczystych taki wzrost stosunkowo nieznacznie wpływa na zmianę ich własności wytrzymałościowych i odkształceniowych.

Wpływ wilgotności na własności mechaniczne drobnoziarnistych i pylistych piasków, a także gruntów gliniastych jest znaczny.

W zależności od zawartości wody zmienia się konsystencja gruntów gliniastych, co pośrednio charakteryzuje ich gęstość i zdolność do odkształcania. Dużej ilości wody w porach gruntu odpowiada konsystencja płynna. Jednakże nie zawsze zwiększenie ilości wody w gruntach prowadzi do osłabienia własności wytrzymałościowych gruntów. Przykładowo, zawilgocenie piasku do wartości $S_r = 0,2 \div 0,3$. Do wielkości $S_r = 0,3$ zwiększa się opór gruntu na przemieszczenie (ściananie), a $S_r > 0,3$ zmniejsza.

Duży wpływ wykazuje wilgotność na wytrzymałość i odkształcalność gruntów gliniastych. Zwiększenie stopnia wilgotności gruntu od 0 do 0,3 prowadzi do pewnego zmniejszenia wartości gęstości krytycznej, a ponad 0,3 – do zwiększenia gęstości krytycznej.

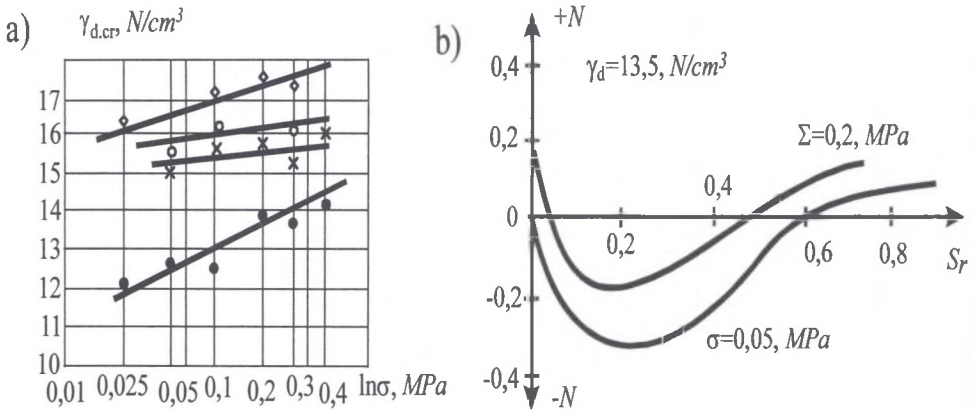
Największy przyrost gęstości krytycznej i ciężaru właściwego szkieletu obserwuje się przy wilgotności gruntu $w = 12 \div 14\%$.

Występowanie ciśnienia porowego, dodatniego lub ujemnego, świadczy o tym, że sam szkielet gruntu w danym stanie naprężeń nie znajduje się w stanie normalnego zagęszczenia, gdyż układ szkieletu gruntu i zawartej w nim wody przy szybkim osunięciu (ściananiu) zachowuje się jak normalnie zagęszczony grunt gliniasty. Brak ciśnienia porowego w procesie osuwania (ścianania) świadczy o tym, że gęstość początkowa gruntu jest bliska lub równa wartości gęstości krytycznej gruntu wilgotnego. Według wielkości i praw ciśnienia porowego można wnioskować, na ile gęstość struktury gruntu dla danych warunków odkształceń różni się od gęstości krytycznej. Stąd, wartościom dodatnim ciśnienia porowego odpowiada stan niedogęszczenia nasyconego wodą gruntu gliniastego, a ujemnym – przegęszczenie.

W celu lepszego wyjaśnienia powyższych stwierdzeń można przedstawić charakterystyczne przykłady.

Przykład

Zbocze o wysokości 30 m zbudowane jest z aluwialnych drobnoziarnistych gęstych piasków o średniej gęstości szkieletu $\gamma_d = 16,5 \text{ N/cm}^3$ przy stopniu wilgotności gruntu $S_r = 0,4$. W dolnej części zbocza (podstawy) do głębokości 10 m zalegają również te same piaski o parametrach $\gamma_s = 26,5 \text{ N/cm}^3$; $\gamma_d = 16,3 \text{ N/cm}^3$; $S_r = 1$. Niżej zalegają gęste piaski średnioziarniste $\gamma_s = 26,5 \text{ N/cm}^3$; $\gamma_d = 17,0 \text{ N/cm}^3$; $S_r = 1$; o miąższości 20 m. Zależność $\gamma_d \sim \sigma$ przedstawiono na rys. 5a.



Rys. 5. Zależności: a) gęstości krytycznej od ciśnienia pionowego w skali półlogarytmicznej
1 – piasek pylisty słabo gliniasty, 2 – piasek drobnoziarnisty, 3 – piasek gruboziarnisty, 4 – less,
b) wpływu wilgotności na wskaźnik gęstości gruntu

Fig. 5. Relationships: a) critical density and vertical pressure in the semi logarithmic scale;
1 – dust sand weakly clayey, 2 – fine-grained sand, 3 – course sand, 4 – loes,
b) an influence of humidity on an indicator of density,
1 – vertical pressure at $\sigma=0,2 MPa$, 2 – vertical pressure at $\sigma=0,05 MPa$

Określić wskaźnik gęstości gruntu w obszarze zbocza na głębokościach 5; 15; 30; m i w jego podstawie względem osi zbocza na głębokościach 5; 15 m.

a) Ciężar właściwy gruntu, współczynnik porowatości, wilgotność gruntu:

- wewnątrz zbocza

$$e = \frac{26,5}{16,5} - 1 = 0,625; \quad w = \frac{100 \cdot 0,605 \cdot 0,4 \cdot 1}{26,5} = 0,91 = 9,1\%; \quad \gamma_1 = 16,5 \left(1 + \frac{9,1}{100} \right) = 18 N / cm^3$$

- w podstawie zbocza:

piasek drobnoziarnisty

$$\gamma_2 = \frac{26,5 - 10}{1 + 0,625} = 10,3 N / cm^3$$

piasek średnioziarnisty

$$\gamma_3 = \frac{26,5 - 10}{1 + 0,560} = 10,6 N / cm^3$$

b) Pionowe składowe ciśnień na wskazanych dla rozważań głębokościach są równe:

- wewnątrz zbocza:

$$\sigma_1 = 0,09 MPa; \sigma_2 = 0,27 MPa$$

- w podstawie zbocza:

$$\sigma_3 = 0,54 MPa$$

piasek drobnoziarnisty

$$\sigma_4 = 0,62 \text{ MPa}$$

piasek średnioziarnisty

$$\sigma_5 = 0,87 \text{ MPa}$$

c) Według zamieszczonego wykresu (rys. 4.5a) określamy wartości gęstości krytycznej, odpowiadające właściwym ciśnieniom:

piasek drobnoziarnisty

$$\gamma_{d.cr.1} = 15,8 \text{ N/cm}^3 \quad \gamma_{d.cr.2} = 16,1 \text{ N/cm}^3 \quad \gamma_{d.cr.3} = 16,3 \text{ N/cm}^3$$

$$\gamma_{d.cr.4} = 16,35 \text{ N/cm}^3$$

Wskaźnik gęstości struktury gruntu równy:

- wewnątrz zbocza:

$$\text{na głębokości 5 m, } N_1 = 26,5 \left(\frac{1}{16,5} - \frac{1}{15,8} \right) = -0,069$$

$$\text{na głębokości 15 m, } N_2 = 26,5 \left(\frac{1}{16,5} - \frac{1}{16,1} \right) = -0,037$$

$$\text{na głębokości 30 m, } N_3 = 26,5 \left(\frac{1}{16,5} - \frac{1}{16,3} \right) = -0,019$$

- w podstawie zbocza:

piasek drobnoziarnisty na głębokości 5 m,

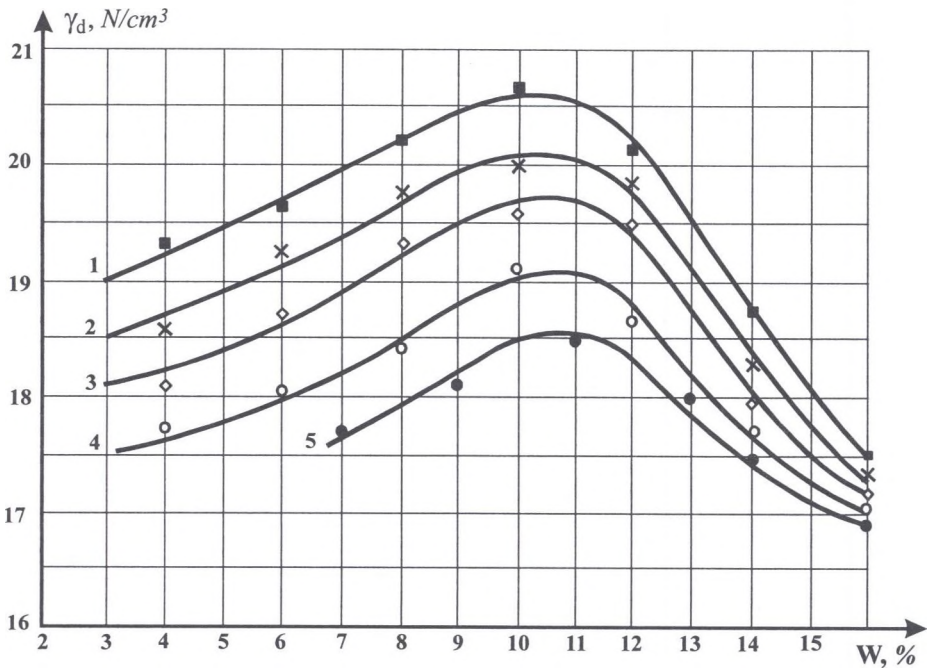
$$N_4 = 26,5 \left(\frac{1}{16,3} - \frac{1}{16,35} \right) = +0,005$$

piasek średnioziarnisty na głębokości 5 m,

$$N_5 = 26,5 \left(\frac{1}{17,0} - \frac{1}{16,1} \right) = -0,088$$

Piaski drobnoziarniste masywu zbocza i średnioziarniste podstawy zbocza znajdują się w stanie zagęszczenia. Piasek drobnoziarnisty podstawy znajduje się w stanie nieznacznego niedogęszczenia, bliskiego do zagęszczenia normalnego.

Zmiana wilgotności gruntu przy zagęszczaniu za pomocą ubijania istotnie wpływa na zmianę ciężaru właściwego szkieletu. Przedstawia to rys. 6.



Rys. 6. Zależność ciężaru właściwego szkieletu gruntu od jego wilgotności:

1-5 – liczba uderzeń na warstwę, odpowiednio 80; 40; 25; 10; 7

Fig. 6. Relationships of a specific gravity of skeleton and its humidity:

1-5 – number of hits on layer, adequately 80, 40, 25, 10, 7

W ten sposób w warunkach laboratoryjnych i polowych można określić charakterystyki gęstości budowy gruntów zbocza dla przypadków różnej wilgotności i warunków naturalnego zalegania.

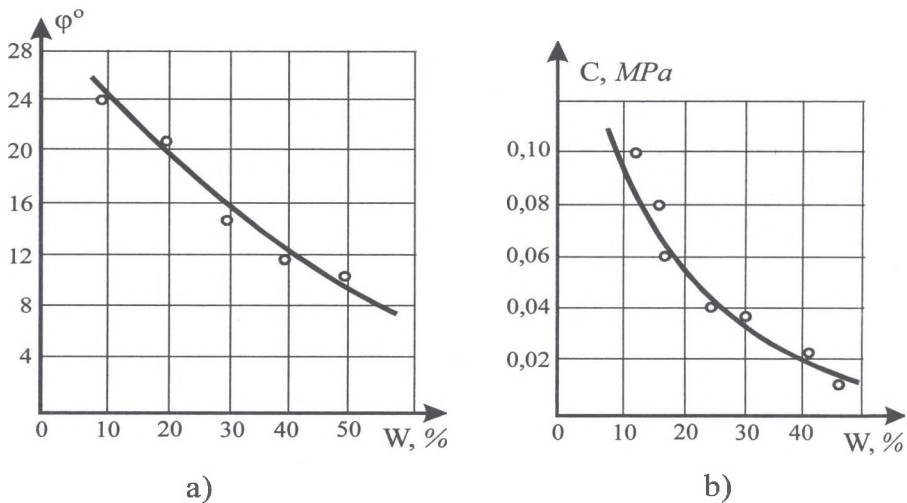
3. Zmiana parametrów wytrzymałościowych gruntu w zboczach przy ich nawilżaniu

Zmiana ciężaru właściwego szkieletu gruntowego, stopnia wilgotności, składu mineralogicznego i granulometrycznego oraz zmiana naprężeń w gruncie zbocza lub skarpy wykazuje znaczny wpływ na jego własności wytrzymałościowe.

Parametrami wytrzymałościowymi gruntów zbocza lub skarpy są ϕ i C . Ogólnie przyjęto określać współczynnik ϕ kątem tarcia wewnętrznego, a C – spoistością gruntu. Parametry wytrzymałościowe gruntu określa się w warunkach laboratoryjnych w wyniku badań próbek w przyrządzie do ścinania lub w edometrze.

Opór ścinania gruntów gliniastych i piaszczystych zależy od gęstości gruntów. Zmniejszenie gęstości i zwiększenie wilgotności gruntu prowadzi podczas badań w warunkach niezakończonych konsolidacji do zmniejszenia wartości współczynnika φ i C , tzn. prowadzi do zmiany charakteru zależności $\varphi = f(\gamma_d)$ i $C = f(\gamma_d)$.

Na rysunku 7 przedstawiono zmianę parametrów wytrzymałościowych przy różnych wartościach wilgotności gruntu. Jak widać z wykresu zamieszczonego na rys. 4.7a i rys. 4.7b, zależności φ i C od wilgotności gruntu są nieliniowe.

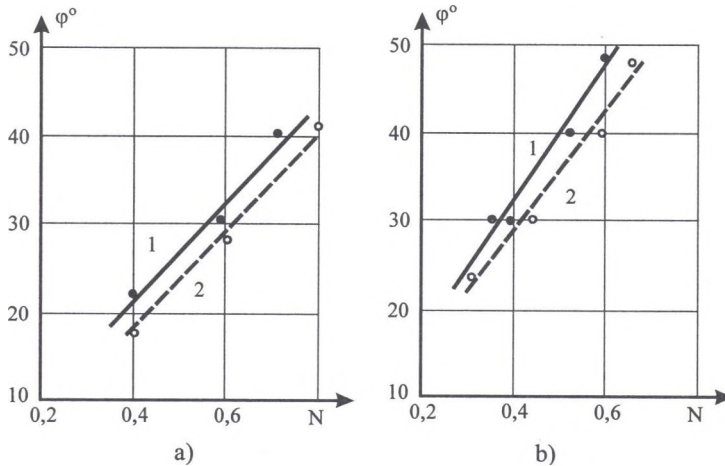


Rys. 7. Zależność φ i C od wilgoci W

Fig. 7. Relationship between φ , C and humidity W

Na rysunku 8 przedstawiono zależności kąta tarcia wewnętrznego od końcowej gęstości zbocza zbudowanego z gruntu piaszczystego. W tym przypadku charakter zależności $\varphi = f(N)$ jest zbliżony do liniowego. Jak widać z rys. 8a i rys. 8b, własności wytrzymałościowe gruntu gwałtownie zmieniają się w obszarach gęstości $N = 0,3 \div 0,6$. W celu określenia własności wytrzymałościowych piasków dla $N < 0,3$ należy przeprowadzić badania przy ciśnieniach pionowych mniejszych od $\sigma = 0,025$ MPa, które trudno otrzymać w przyrządach do ścinania lub w edometrze. Trudno również prowadzić badania przy ciśnieniu $\sigma > 1,6$ MPa. Jednakże przeprowadzone badania doświadczalne wykazały, że gęstość gruntu przy ścinaniu ze wzrostem stanu naprężeń zmniejsza się i, poczynając z określonego dla danego gruntu ciśnienia, spada do wartości gęstości krytycznej. W miarę zmniejszania ciśnienia pionowego w przyrządzie do ścinania przedział ostatecznych gęstości zwiększa się, odpowiednio zwiększa się przedział możliwych wartości kąta tarcia wewnętrznego. Dlatego kąt tarcia

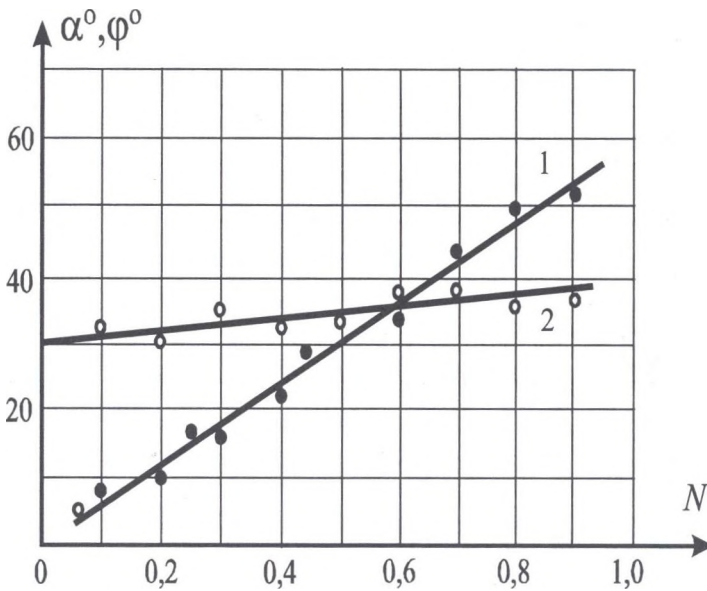
wewnętrzny gruntu piaszczystego przy niewielkich ciśnieniach pionowych może zmieniać się w bardziej znaczących przedziałach. Wynika stąd, że jednakowym wartościom ciężaru właściwego szkieletu, przy różnych ciśnieniach pionowych, odpowiadają różne wartości φ .



Rys. 8. Zależność φ od gęstości N : a) piasek drobnoziarnisty; b) piasek gruboziarnisty; 1 – w stanie powietrzno suchym; 2 – w stanie nasyconym wodą
Fig. 8. Relationships φ and density N : a) fine grained sand, b) coarse grained sand; 1 – in the air-dry state; 2 – in the state of water saturation

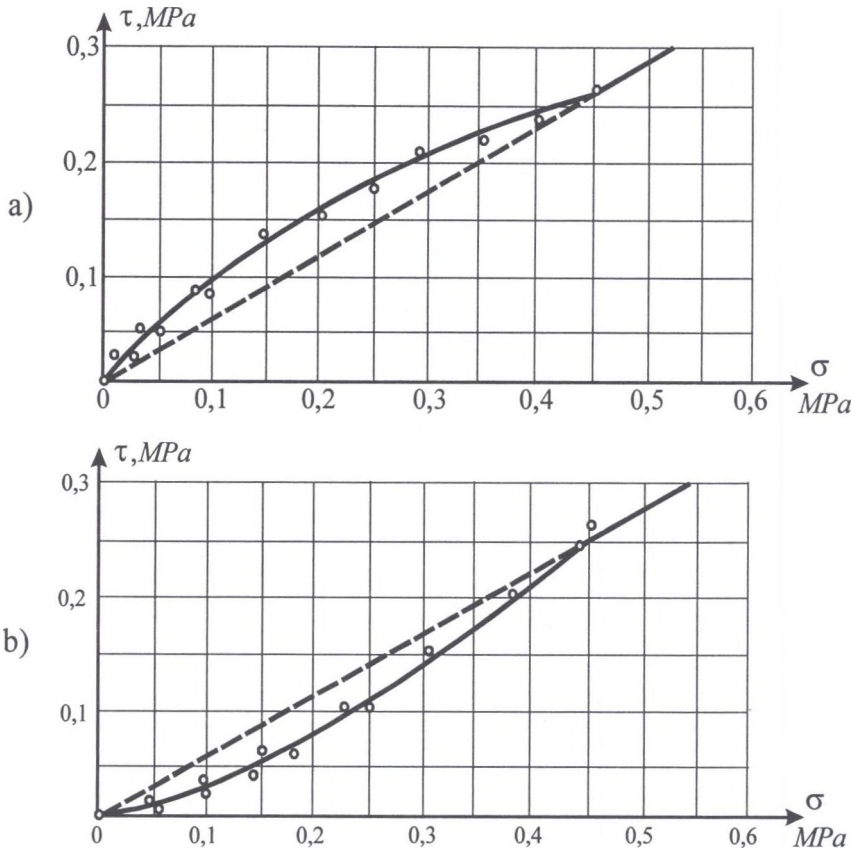
Kąt zbrocza dla gruntów piaszczystych często przyjmuje się jako równy kątowi tarcia wewnętrznego φ . Jednakże fizycznie kąty naturalnego zbrocza z drobnoziarnistych gruntów mogą być większe niż kąty tarcia wewnętrznego. Tłumaczy się to tym, że kąt naturalnego zbrocza zależy od tej gęstości, z którą piasek zalega przy usypywaniu oraz od stopnia jego zagęszczenia przy prawie zupełnym braku dociążenia.

Na rysunku 9 zamieszczono zależności kąta naturalnego zbrocza α i kąta tarcia wewnętrznego φ od gęstości gruntu dla ciśnienia $\sigma = 0,025$ MPa. Porównując te linie można zauważyć, że tylko dla gęstości właściwej $N = 0,6$ wartości φ i α są równe. Przy innych wartościach gęstości właściwej charakterystyki te są różne.



Rys. 9. Zależność φ i α od gęstości gruntu dla $\sigma = 0,025$ MPa:
 1 – kąt tarcia wewnętrznego φ ; 2 – kąt naturalnego zbocza α
 Fig. 9. Relationship φ , α and ground density for $\sigma = 0,025$ MPa:
 1 – friction angle φ , 2 – angle of a natural slope α

Należy zauważyć, że zagęszczone grunty w procesie osuwania się rozluźniają się w tym większym stopniu, im większe naprężenie one przyjmują, i poczynając z określonego poziomu naprężeń, osiągają gęstość krytyczną. W procesie osuwania się zagęszczonego gruntu zachodzi zmniejszenie wartości φ i C , wywołane jego rozluźnieniem, co ma miejsce w zewnętrznych brzeżnych obszarach niecek osiadania. Ze wzrostem ciśnienia pionowego na grunt przegęszczony absolutna wartość rozluźnienia zwiększa się, gęstość jego zmniejsza się i zależność $\tau = f(\sigma)$ ma charakter nieliniowy (rys. 10a). Jednakże krzywa $\tau = f(\sigma)$ na odcinku wklęsłości do osi σ nie opisuje wszystkich możliwych przypadków zmiany zależności oporu ścinania od stanu naprężeń gruntu. W miarę tego, jak końcowa gęstość zagęszczonego gruntu zbliża się do wartości krytycznej i ostatecznie osiąga ją, można obserwować odwrotne skrzywienie zależności $\tau = f(\sigma)$, (rys. 10b).

Rys. 10. Wygięcie zależności liniowej $\tau = f(\sigma)$ Fig. 10. Flexion of linear dependence $\tau = f(\sigma)$

W ten sposób podstawową zależnością w zmianach oporu na ścinanie gruntu ze wzrostem stanu naprężeń jest to, że naprężenia ścinające, jak i gęstość gruntu, w procesie ścinania zmieniają się do wartości, odpowiadających naprężeniom stycznym przy gęstości równej krytycznej. Wynika stąd, że nie tylko ciężar właściwy szkieletu posiada pewne wartości krytyczne, ale również krytyczne wartości posiadają naprężenia styczne τ_{cr} i kąt tarcia wewnętrzznego φ_{cr} dowolnego rodzaju gruntu. Pomiar gęstości gruntu w procesie osuwania jest drugą przyczyną, wywołującą ugięcie zależności $\tau = f(\sigma)$.

W procesie osuwania (ścianania) w dużym przedziale naprężeń zależność $\tau = f(\sigma)$ może okazać się nieliniowa wskutek zmiany składu granulometrycznego, powodowanego mechanicznym niszczeniem cząstek. Jest to trzecia przyczyna nieliniowości $\tau = f(\sigma)$.

W procesie osuwania się gruntu gęstość jego zmienia się. Oczywiście jest, że zmienia się zarówno stopień wilgotności gruntu nienasyconego wodą jak i wilgotność wagowa

nasyconego wodą. Z kolei zwiększenie stopnia wilgotności wywołuje zmianę: gęstości gruntu, gęstość krytyczną i graniczne wartości naprężeń normalnych i stycznych, co w sumie może stanowić przyczynę ugięcia zależności $\tau = f(\sigma)$. Jest to czwarta przyczyna ugięcia zależności liniowej $\tau = f(\sigma)$.

Prócz wymienionych przyczyn ugięcia zależności liniowej $\tau = f(\sigma)$ jest jeszcze jedna, która związana jest ze zmianą wskaźnika gęstości gruntu przy zwiększeniu poziomu stanu naprężeń, oddziałującego na grunt, co ma miejsce w wewnętrznej części brzeżnej niecki osiadania. Wzrost wskaźnika gęstości gruntu świadczy o zwiększaniu się potencjalnych odkształceń objętości i obniżeniu się oporu na ścinanie gruntu.

W ten sposób dla stałych wartości gęstości, składu granulometrycznego i stopnia wilgotności gruntu właściwe są różne wartości oporu gruntu na ścinanie w zależności od przekazywanego na niego poziomu naprężeń lub „opóźniania odkształceń przy zwiększeniu naprężeń”. Jest to piąta przyczyna ugięcia zależności liniowej $\tau = f(\sigma)$.

Zwiększenie gęstości gruntu do wartości krytycznej i większej, przy jednakowym stopniu wilgotności i stałym stanie naprężeń, prowadzi do wzrostu parametrów wytrzymałościowych w gruntach. Tym nie mniej i w takich warunkach przy jednej i tej samej gęstości gruntu można otrzymać różne wartości ścinających sił. Przykładowo, wypełniając wodą przegęszczony grunt przy określonej początkowej gęstości i następnie badając go na ścinanie, według metody otwartej i zamkniętej, otrzymamy różne wyniki. Ścinanie według metody ścinania drenowanego umożliwia otrzymanie wartości maksymalnych granicznych naprężeń stycznych w gruncie niedogęszczonym i wartości minimalnych w gruncie przegęszczonym. Ścinanie według metodyki ścinania niedrenowanego daje przeciwne wartości τ . Przyczyną tych rozbieżności jest wpływ ciśnienia porowego. Jednakże ciśnienie porowe bezpośrednio nie wpływa na wartość tarcia wewnętrznego gruntu. Stąd, pewna część naprężeń, przekazywanych na grunt, przejęta przez wodę, która wypełnia pory, zależy od wartości ciśnienia w szkielecie gruntu i wartości współczynnika ścinania. Przy ścinaniu gruntu niedogęszczonego ciśnienie porowe zmniejsza wartość ciśnienia normalnego.

Pierwsze ciśnienie nie zawsze obniża ciśnienie w szkielecie gruntu. Przykładowo, jeśli w przyrządzie ściskania trójosiowego badać grunt przegęszczony metodą zamkniętą, to powstające przy ścinaniu ujemne wartości ciśnienia porowego przeszkadzają rozluźnieniu gruntu. Wynika stąd, że zmiana w szkielecie gruntu w procesie osuwania (ściania) zależy od znaku ciśnienia porowego, który określa się za pomocą gęstości gruntu, tzn. na wartość ciśnienia porowego istotny wpływ wykazuje wartość współczynnika porowatości i porowatości krytycznej.

Należy zauważyć, że w gruncie nie nasyconym wodą wilgotność wykazuje istotny wpływ na wartość parametrów wytrzymałościowych. Przyczyną tego jest zmiana gęstości struktury masywu gruntu w zboczach lub skarpach w procesie opadów atmosferycznych ciągłych lub jego namaczania. Zatem, nawilgocenie gruntu powietrznie suchego, występującego w zboczach w normalnym stanie zagęszczenia, do stopnia wilgotności $0,2 \div 0,3$, prowadzi do wzrostu kąta tarcia wewnętrznego i siły kohezji.

W wyniku takiego nawilżenia grunt staje się wytrzymalszy, a jego zdolność nośna wzrasta, tzn:

$$\varphi = \varphi_{cr} + \Delta\varphi_1$$

$$C = C_{cr} + \Delta C_1,$$

gdzie: φ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu,

φ_{cr} – kąt tarcia wewnętrznego dla gęstości krytycznej [grad],

c – siła spójności [MPa],

c_{cr} – siła spójności dla gęstości krytycznej gruntu [MPa],

$\Delta\varphi$ i Δc – przyrosty przy zagęszczaniu.

Dotatkowe nawodnienie gruntu od $S_r = 0,2 \div 0,3$ do $S_r = 0,6$ i więcej przy stałej wartości ciężaru właściwego szkieletu prowadzi do zmniejszenia kąta tarcia wewnętrznego i siły spójności gruntu, tj.:

$$\varphi = \varphi_{cr} + \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2$$

$$C = C_{cr} + \Delta C_1 - \Delta C_2$$

W gruntach piaszczystych wpływ wilgotności na parametry wytrzymałościowe jest stosunkowo niewielki i przejawia się przy niepełnym nasyceniu gruntu wodą.

Całkowicie inny obraz można obserwować w gruntach pyłowych, które stosunkowo szybko chłoną wodę. Tutaj wilgotność wykazuje istotny wpływ na wartość krytycznej wilgotności, wskaźnik gęstości gruntu oraz na wytrzymałościowe i odkształceniowe parametry. W gruntach lessowych osiadających nawilgocenie do wartości $S_r=0,6$ i więcej wywołuje gwałtowne zwiększenie wartości gęstości krytycznej, zmniejszenie kąta tarcia wewnętrznego i siły spójności.

Nawilgocenie gruntów gliniastych zachodzi stosunkowo powoli z uwagi na jego małą przepuszczalność wodną. Odpowiednio do prędkości nawilgocenia powoli zmieniają się wartości gęstości krytycznej, kąta tarcia wewnętrznego i siły kohezji i powoli zachodzą odkształcenia objętościowe wywoływane nawilgoceniem gliny.

W ten sposób zmiana wilgotności gruntu w zboczach w brzeżnych obszarach niecek osiadania i skarpach wpływa na gwałtowną zmianę ciężaru właściwego gruntu, na gęstość krytyczną, na powstanie dodatkowych naprężeń w masywie gruntu i wykazuje istotny wpływ na obniżenie wartości parametrów wytrzymałościowych, co jest główną przyczyną powstawania strumieni osuwiskowych i naruszenia stateczności zboczy. Jest to zjawisko niekorzystne z punktu ochrony obiektów znajdujących się w takich obszarach (występuje zagrożenie dla bezpiecznego użytkowania obiektów powierzchniowych).

LITERATURA

1. Chudek M. (red.) pt.: „Kompleksowa metoda prognozowania oddziaływania wpływu podziemnej eksploatacji złóż oraz wstrząsów górotworu na chronione obiekty powierzchniowe w brzeżnym obszarze niecki obniżeniowej. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2003.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Andrzej Zorychta